

**Evolutionärer Test
des Zeitverhaltens von Realzeit-Systemen**

Joachim Wegener

Berichte aus der Softwaretechnik

Joachim Wegener

**Evolutionärer Test des Zeitverhaltens
von Realzeit-Systemen**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Wegener, Joachim:

Evolutionärer Test des Zeitverhaltens von Realzeit-Systemen/

Joachim Wegener. Aachen: Shaker, 2001

(Berichte aus der Softwaretechnik)

Zugl.: Berlin, Humboldt-Univ., Diss., 2001

ISBN3-8265-9260-3

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9260-3

ISSN 1433-9986

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Für den Test funktionaler Eigenschaften von Programmen konnten in den vergangenen Jahrzehnten solide theoretische Grundlagen erarbeitet werden, für die eine Reihe kommerzieller Tools zur Automatisierung von Teilaktivitäten des Testes verfügbar ist.

Ganz anders ist die Situation beim Test nicht-funktionaler Eigenschaften. Obwohl das zeitliche Verhalten insbesondere bei Realzeit-Systemen Teil der Spezifikation des Systemverhaltens ist und somit Gegenstand der Überprüfung zu sein hat, gab es bislang noch keine allgemein akzeptierten Testverfahren für die Überprüfung des Zeitverhaltens von Programmen.

Hier setzen die Untersuchungen von Herrn Wegener an, dessen originäre Idee darin besteht, die Theorie evolutionärer Algorithmen auf den Laufzeittest anzuwenden. Mit der auf diese Weise von ihm begründeten Methode des evolutionären Tests wird wissenschaftliches Neuland beschritten, das sich bereits befruchtend auf die Arbeit anderer Autoren ausgewirkt hat.

Besonders erfreulich ist dabei, daß sich hier Industrieforschung im positiven Sinne des Wortes verwirklicht: Einerseits entstanden Forschungsergebnisse, die auf allen bedeutenden internationalen Fachtagungen zur Testproblematik (wie etwa EuroSTAR, Quality Week, IEEE Real-Time Technology and Application Symposium) präsentiert wurden. Andererseits konnten die Ergebnisse kurzfristig zur Produktionsreife geführt werden, angewandt auf den Laufzeittest von Realzeit-Systemen im Fahrzeugbau (u. a. Airbagsteuerung und Motorelektronik) bei DaimlerChrysler. Gerade die Bedingungen eines industriellen Umfelds führten dazu, daß Untersuchungen nicht mit einer 'schönen Theorie' beendet, sondern bis hin zu einer Toolunterstützung getrieben wurden, bei der der Tester mit nur geringem manuellen Einsatz von dem ansonsten immensen algorithmischen Aufwand des evolutionären Tests befreit wird.

Die Umsetzung der Ideen im Rahmen der Arbeit ist eine Freude für den Leser, sowohl was den sprachlichen Stil als auch die Systematik der Darstellung und die technische Realisierung anbelangt.

Prof. Dr. K. Bothe

Berlin, 21. Juni 2001

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat. der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität zu Berlin vorgelegt und genehmigt. Die wissenschaftliche Aussprache fand am 7. Mai 2001 statt.

Prof. Klaus Bothe danke ich für seine Bereitschaft zur Betreuung dieser Dissertation sowie für seine wertvollen Anregungen und Verbesserungsvorschläge zu Inhalt und Aufbau der Arbeit. Prof. Andreas Spillner, Prof. Wolfgang Merker und Prof. Bryan Jones danke ich dafür, daß sie die Arbeit beständig und interessiert verfolgt haben und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Bei Dr. Siegfried Vössner und Michael O'Sullivan von der Stanford University sowie Dr. Oliver Jack und Prof. Fevzi Belli von der Universität Paderborn bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit bei der Definition der Abbruchkriterien für den evolutionären Test. Dr. Frank Müller von der Humboldt-Universität danke ich für die gemeinsame Bearbeitung des Vergleichs von statischen Analysen und evolutionären Tests.

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit für die Daimler-Chrysler AG. Insbesondere bei meinen Kollegen Dr. Harmen Sthamer und Dr. Hartmut Pohlheim möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung meiner Arbeit bedanken, die entscheidend zum Gelingen beigetragen hat. Meinen Kollegen Dr. Matthias Grochtmann, Roman Pitschinetz, Eckard Lehmann und Babette Bär danke ich für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit und viele gute Hinweise. Thomas Wierczoch danke ich für seine Unterstützung bei der Durchführung der initialen Experimente. Johannes Jain und André Baresel möchte ich meine Anerkennung für ihr großes Engagement bei der Bearbeitung nachgelagerter Themen, die in dieser Arbeit viel zu kurz gekommen sind, zum Ausdruck bringen. Bei Henriette Vahle, Miriam Mann, Susanne Farun und Cornelia Schultheiss möchte ich mich schließlich für die geduldige Hilfe bei der Erstellung der fremdsprachigen Veröffentlichungen bedanken, ohne die diese Arbeit sicherlich nicht eine so große Beachtung gefunden hätte.

Meinem Freund Carsten Schrenk danke ich für den endgültigen Anstoß zur Verfassung dieser Arbeit. Ivonne Feuer und meiner Tochter Noelle möchte ich meinen Dank für viele aufmunternde Worte und ihre große Rücksichtnahme aussprechen. Meinen Eltern und Freunden danke ich für ihr Verständnis und ihre moralische Unterstützung. Ich widme diese Arbeit meinem unvergessenen Freund Dr. Lars Gierke.

Joachim Wegener

Stolpe, 17. Juli 2001

Zusammenfassung

Die Entwicklung von Realzeit-Systemen ist von hoher industrieller Bedeutung. Der Test bildet die wichtigste analytische Qualitätssicherungsmaßnahme für Realzeit-Systeme. Für die Prüfung von Realzeit-Systemen sind das funktionale und das zeitliche Programmverhalten gründlich zu testen. Es mangelt jedoch an Testmethoden, die eine umfassende und weitgehend automatisierte Prüfung der zeitlichen Eigenschaften von Realzeit-Systemen unterstützen. Diese Lücke soll der evolutionäre Test schließen.

Ziel des evolutionären Tests ist es, Fehler im Zeitverhalten des zu prüfenden Systems aufzudecken. Hierzu werden Eingabesituationen mit besonders langen oder kurzen Ausführungszeiten gesucht, deren Verarbeitung durch das Testobjekt zu einer Verletzung der spezifizierten Zeitschranken führt. Die Suche nach Eingabesituationen mit extremen Ausführungszeiten wird als Optimierungsproblem aufgefaßt, das mit Hilfe von evolutionären Algorithmen bearbeitet wird. Die Zielfunktion der Optimierung bilden die Ausführungszeiten des Testobjekts, der Suchraum ist durch den Eingabedatenraum des Testobjekts gegeben.

In einer Reihe von Experimenten wird der evolutionäre Test mit statischen Analysen, Zufallstests sowie Funktions- und Strukturtests verglichen. Dabei zeigt sich die Leistungsfähigkeit des evolutionären Tests. In vielen Fällen gelingt es dem evolutionären Test, die längsten und kürzesten Ausführungszeiten des Testobjekts präzise anzunähern und genauere Abschätzungen der extremen Ausführungszeiten zu liefern als die anderen Verifikationsverfahren. Weitere Vorteile des evolutionären Tests liegen in den geringen Voraussetzungen für seinen Einsatz, der vollständigen Automatisierbarkeit und der Möglichkeit, einen geeigneten Zeitpunkt für die Beendigung des Tests anhand des Konvergenzstatus der Population zu bestimmen.

Mit dem evolutionären Test steht eine auf den Test des Zeitverhaltens spezialisierte Testmethode zur Verfügung, die zu einer Verbesserung der Qualität und zu einer kostengünstigeren Entwicklung von Realzeit-Systemen führen kann. Aus der Kombination von Funktionstests und evolutionären Tests ergibt sich eine leistungsfähige Teststrategie, mit der sich das logische und das zeitliche Verhalten von Realzeit-Systemen systematisch prüfen läßt.

Abstract

The development of real-time systems has major impact on today's industry. For real-time systems the most important analytical quality assurance activities lie in testing. And, real-time systems need to be checked thoroughly for their

functional and temporal program behavior. Still, testing methods supporting an extensive and largely automated test of temporal characteristics in real-time systems are rare. Evolutionary testing is a means to bridge this gap.

The evolutionary test aims at uncovering errors in the temporal behavior of the system under test. Here, input situations with the longest and shortest execution times which violate the specified timing constraints are searched for. This search for input situations with extreme execution times is taken as an optimization problem which is solved with evolutionary algorithms. The target function of the optimization is given by the execution times of the test object, the test object's input data provides the search area.

Several experiments are carried out in order to compare the evolutionary testing method with static analyses, random testing, as well as functional and structural testing. These experiments reveal the effectiveness of evolutionary tests. In many cases the evolutionary test achieves a precise approximation of longest and shortest execution times of the test object and it provides more exact estimates of the extreme execution times than other verification methods. Further advantages of the evolutionary test are the modest requirements for its application, the complete automatability, and the option to determine an adequate time for termination using the convergence status of the population.

Evolutionary testing provides a specialized method for testing temporal behavior which may enhance the quality and reduce costs in the development of real-time systems. The combination of functional and evolutionary testing methods adds up to an efficient testing strategy which provides the basis for a systematic test of logical and temporal behavior in real-time systems.

Stolpe, den 4. Juli 2000

Inhalt

KAPITEL 1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	1
1.2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND AUFBAU DER ARBEIT	5
KAPITEL 2 GRUNDLAGEN VON REALZEIT-SYSTEMEN UND BESONDERHEITEN FÜR DEN TEST	9
KAPITEL 3 ÜBERBLICK TESTAKTIVITÄTEN UND TESTMETHODEN.....	15
3.1 TESTPHASEN.....	17
3.2 TESTAKTIVITÄTEN.....	18
3.2.1 <i>Testplanung</i>	18
3.2.2 <i>Testorganisation</i>	20
3.2.3 <i>Testdokumentation</i>	22
3.2.4 <i>Testfallermittlung</i>	22
3.2.5 <i>Testdurchführung</i>	25
3.2.6 <i>Monitoring</i>	27
3.2.7 <i>Testauswertung</i>	29
3.3 METHODEN DER TESTFALLERMITTLUNG	30
3.3.1 <i>Klassifikation von Testmethoden</i>	30
3.3.2 <i>Methoden für den Test des logischen Systemverhaltens</i>	32
3.3.3 <i>Methoden für den Test des zeitlichen Systemverhaltens</i>	42
3.3.4 <i>Zusammenfassende Bewertung der Testmethoden</i>	45
3.4 ZUSAMMENFASSUNG	50
KAPITEL 4 EVOLUTIONÄRE ALGORITHMEN	53
4.1 STRUKTUR EVOLUTIONÄRER ALGORITHMEN	55
4.2 FITNEßBEWERTUNG	58
4.3 SELEKTION	59
4.4 REKOMBINATION	61
4.5 MUTATION.....	64
4.6 EINFÜGEN DER NACHKOMMEN	67
4.7 UNTERPOPULATIONEN, MIGRATION UND KONKURRENZ	69
4.8 GENETISCHE ALGORITHMEN, EVOLUTIONSSTRATEGIEN UND EVOLUTIONÄRE PROGRAMMIERUNG	72
4.9 ZUSAMMENFASSUNG	74

KAPITEL 5 EVOLUTIONÄRER TEST.....	77
5.1 STRUKTUR DES EVOLUTIONÄREN TESTS.....	79
5.2 TECHNISCHE UMSETZUNG	84
5.3 EIGNUNG EVOLUTIONÄRER ALGORITHMEN FÜR DEN TEST DES ZEITVERHALTENS	89
5.4 BEISPIELHAFTE ANWENDUNG.....	95
5.4.1 <i>Erste Tests mit genetischen Algorithmen</i>	96
5.4.2 <i>Umstellung des Tests auf evolutionäre Algorithmen</i>	98
5.4.3 <i>Erweiterung des Tests um evolutionäre Operatoren für Ordnungsprobleme</i>	101
5.4.4 <i>Beschränkung des Tests auf die erfolgreichen Strategien</i>	108
5.5 BEWERTUNG.....	111
5.6 ZUSAMMENFASSUNG	114
KAPITEL 6 VERGLEICH DES EVOLUTIONÄREN TESTS MIT ANDEREN VERFAHREN ZUR VERIFIKATION DES ZEITVERHALTENS.....	117
6.1 TESTOBJEKTE	119
6.2 EXPERIMENTIERUMGEBUNGEN	125
6.3 ÜBERSICHT DER DURCHFÜHRTEN EXPERIMENTE	129
6.4 VERGLEICH VON STATISCHER ANALYSE UND EVOLUTIONÄREM TEST ..	130
6.4.1 <i>Statische Analysen</i>	130
6.4.2 <i>Werkzeugunterstützung für die statische Analyse</i>	132
6.4.3 <i>Ergebnisse</i>	134
6.4.4 <i>Bewertung</i>	140
6.5 VERGLEICH VON ZUFALLSTEST UND EVOLUTIONÄREM TEST.....	148
6.5.1 <i>Ergebnisse</i>	148
6.5.2 <i>Bewertung</i>	167
6.6 VERGLEICH VON FUNKTIONS- UND STRUKTURTEST SOWIE EVOLUTIONÄREM TEST.....	170
6.6.1 <i>Ergebnisse für die Beispiele Computer-Graphik I und Computer-Graphik II</i>	171
6.6.2 <i>Ergebnisse für die Beispiele der Motorsteuerung und für die Navigationssoftware</i>	180
6.6.3 <i>Ergebnisse für Matrix und Bubblesort</i>	184
6.6.4 <i>Bewertung</i>	188
6.7 ZUSAMMENFASSUNG	193

KAPITEL 7 TESTSTRATEGIE FÜR REALZEIT-SYSTEME.....	197
7.1 KLASSIFIKATIONSBAUM-METHODE.....	197
7.2 TESTSTRATEGIE.....	203
7.3 AUTOMATISIERUNG DER TESTSTRATEGIE MIT DEM TESTSYSTEM	
TESSY.....	207
7.3.1 Testsystem TESSY.....	207
7.3.2 Integration des evolutionären Tests in das Testsystem	
TESSY.....	213
7.4 ZUSAMMENFASSUNG.....	218
KAPITEL 8 ABRUCHKRITERIEN FÜR DEN	
 EVOLUTIONÄREN TEST.....	221
8.1 QUANTITATIVE ABRUCHKRITERIEN.....	221
8.2 QUALITATIVE ABRUCHKRITERIEN.....	223
8.2.1 Auf einer Analyse der Zielfunktionswerte beruhende	
Abbruchkriterien.....	223
8.2.2 Auf einer Analyse der Individuenverteilung im Suchraum	
beruhende Abbruchkriterien.....	226
8.2.3 Zusätzlicher Nutzen von Cluster-Analysen.....	236
8.3 ZUSAMMENFASSUNG.....	236
KAPITEL 9 DISKUSSION.....	239
9.1 GEGENÜBERSTELLUNG DER BETRACHTETEN TESTVERFAHREN.....	239
9.2 VORGEHENSWEISE BEIM EVOLUTIONÄREN TEST.....	244
9.3 NICHTDETERMINISMEN UND INTERNE ZUSTÄNDE DES TESTOBJEKTS....	245
9.4 ARBEITEN ANDERER AUTOREN ZUM EVOLUTIONÄREN TEST DES	
ZEITVERHALTENS.....	247
9.5 ARBEITEN ANDERER AUTOREN ZU EVOLUTIONÄREN TESTS.....	250
9.6 ZUSAMMENFASSUNG.....	257
KAPITEL 10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	259
LITERATURVERZEICHNIS.....	271
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	287
TABELLENVERZEICHNIS.....	291